

WiFi기반 모바일 임베디드 시스템을 위한 통합 전력 제어 기법

(An Integrated Power Management Framework for
WiFi-based Mobile Embedded Systems)

민정희[†] 차호정^{**}
(Jung-hi Min) (Hojung Cha)

요약 근래 들어 모바일 임베디드 시스템의 기능이 다양화 되고 멀티미디어 응용 등의 사용 증대로 인해 시스템 가용시간의 연장을 바라는 사용자의 요구가 증가하고 있다. 본 논문은 모바일 임베디드 시스템의 효율적인 에너지 관리를 위하여 수행되는 응용프로그램의 종류를 고려한 통합전력제어 기법을 제시한다. 기존의 방법들은 CPU와 WNIC의 소모 에너지 절감을 위한 동적 전압 및 주파수 변경기법과 동적 전력모드 제어기법들을 따로 사용하거나 서로 관계가 없다는 가정하에 단순히 결합하여 시스템에 적용시켰다. 하지만 제시되는 매커니즘은 WNIC을 통하여 들어오는 네트워크 트래픽을 분석하여 응용의 종류를 판단한 후 판단된 응용의 특성을 반영하여 CPU와 WNIC를 적절한 전력모드로 동적으로 제어함으로써 시스템 레벨의 에너지 소모를 효율적으로 줄일 수 있다. 실험결과는 제시되는 매커니즘에 의해 기존의 CPU와 WNIC의 모드를 별개로 제한한 방법에 비해 BE (Best Effort) 응용, CBR (Constant Bit Rate) 응용, 그리고 Interactive 응용에 대해서 평균 9%, 최대 16%까지의 소모 에너지 절감 효과를 보였다.

키워드 : 중앙처리장치, 무선 네트워크 인터페이스, 동적 전압 제어, 동적 전력 제어, 소모 에너지

Abstract In these days, the demand of users to extend available period of mobile systems is increased according as the functions of mobile systems have been varied and the use of multimedia application has been increased. This paper proposes an integrated power management framework that considers executed workload types for effective energy management. The conventional methods use DVFS technique for CPU and DPM technique for WNIC separately or simply combine them based on the assumption that they are orthogonal one another. However, the proposed mechanism determines the kind of workload under analysis of the characteristics of workloads incoming through a WNIC. The proposed method can reduce energy consumption of system level effectively by controlling CPU and WNIC to proper power mode based on analyzed characteristics of workload. The experimental result shows the proposed method reduces energy consumption by 9% for BE (Best Effort) workload, CBR (Constant Bit Rate) workload, and Interactive workload on average and by 16% to maximum when compared with the conventional methods which simply combine DVFS technique for CPU and DPM technique for WNIC.

Key words : CPU, WNIC, power state, DVFS, DPM, energy consumption

1. 서론

최근 PDA, 스마트폰, 휴대폰 등의 모바일 무선 임베

디드 시스템이 기존의 통신 기능 외에 스트리밍 멀티미디어 콘텐츠, 웹 응용 등의 다양한 응용을 수행함에 따라 기존보다 장시간의 서비스를 제공할 수 있는 대용량의 전력공급이 요구되고 있다. 하지만 배터리의 용량은 제한되어 있으며 이로 인한 효율적인 전력제어가 중요시 되고 있다. [1]에 의하면 모바일 무선 시스템의 주요 구성요소는 크게 CPU, 디스플레이, 메모리, 통신모듈이 있으며 이 중 CPU와 디스플레이가 전체 시스템이 소모하는 에너지의 약 65%, 통신모듈이 약 35%를 소모한

· 본 연구는 한국학술진흥재단 선도자연구지원사업(과제번호: 2004-8-0205)으로 수행하였음

† 학생회원 : 연세대학교 컴퓨터학과

jhmin@cs.yonsei.ac.kr

** 종신회원 : 연세대학교 컴퓨터학과 교수

hjcha@cs.yonsei.ac.kr

논문접수 : 2006년 5월 24일

심사완료 : 2006년 8월 16일

다. 따라서 이들 요소들에 대한 전력제어를 통해 배터리 기반의 제한된 공급전력을 가지는 모바일 단말 시스템의 효율성을 높일 수 있다. 본 논문은 이들 요소 중 CPU와 통신모듈인 WNIC에 초점을 맞추어 효율적인 전력제어 기법을 제시한다.

CPU와 WNIC의 소모 에너지를 줄이기 위한 기존의 연구들은 CPU와 WNIC 각각의 소모 에너지를 줄이기 위한 기법에 초점이 맞추어져 있었다[2-4]. 하나의 시스템을 위한 전력 정책을 구성할 때도 CPU와 WNIC 각각에 대한 DVFS(Dynamic Voltage and Frequency Scaling: 동적 전압 및 주파수변경)와 DPM(Dynamic Power Management: 동적 전력 제어)정책을 단순히 결합하는 방식으로 구현되었다[5,6]. 뿐만 아니라 CPU와 WNIC간의 전력 소모 면에서의 상호 영향은 고려되지 않았다.

본 논문은 먼저 무선 네트워크를 통해 들어오는 네트워크 트래픽을 온라인 상태에서 분석하여 응용의 종류를 판단하고 분석된 응용에 적합한 CPU와 WNIC의 모드를 결정하는 기법을 제시한다. 특히 CPU와 WNIC의 상호 영향을 분석하여 이 분석 결과를 고려하여 에너지 소모 면에서 보다 효율적으로 CPU와 WNIC의 모드를 결정하는 기법을 제시한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 연구배경과 관련연구에 대해 기술한다. 3장에서는 제시하는 매커니즘에 대해 기술한다. 4장에서는 실험 방법 및 결과에 대해 기술하고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

제시되는 매커니즘은 CPU DVFS 기법[5,6,8,10,16], WNIC DPM 기법[1-3,4,7,9], 그리고 기존의 시스템 레벨에서의 DPM 기법 [6]과 비교된다.

CPU는 응용을 수행 할 때 뿐만 아니라 커널의 디바이스 드라이버를 동작시킬 때, 시스템을 유지하기 위하여 여서도 계속 사용되는 요소이므로 전체 시스템의 소모 에너지를 줄이기 위하여 중요한 요소다. 근래의 프로세서들은 CPU의 소모전력 절감을 위해 DVFS기능을 지원하고 있다. 주파수는 동일 전압 내에서 보다 세밀하게 조절될 수 있다. DVFS기법은 프로세스들이 주어진 타임아웃 내에 끝났을 때 CPU가 유휴상태에 있는 슬랙타임 동안 CPU의 전압과 주파수를 낮추어 CPU의 소모 에너지를 줄이는 기법이다. DVFS는 크게 실시간 시스템에서의 DVS와 비 실시간 시스템에서의 DVS로 나눌 수 있다. 전자는 작업 내 DVS와 작업간 DVS로 크게 나누어진다[2]. 후자는 수시로 변하는 시스템에 대한 작업 부하량을 정확히 예측하여 QoS의 저하없이 신속히 전압 및 클럭주파수를 적응시키는 것이 중요하다. 이 기법에는 간격기반 예측기법과 피드백을 이용하는 기법이

사용되고 있다[11,12]. 그 외에도 DVFS에 관한 연구는 다수가 발표되었다[5,6,8,10,16].

무선 네트워크의 소모 에너지를 줄이기 위해 프로토콜을 이용한 방법[4,9]과 시스템 레벨에서의 기법[1-3,7]이 사용되고 있다. 이 중 본 연구와 관련 있는 시스템 레벨에서의 기법은 WNIC의 전력 모드 전환을 통한 방법이 사용되고 있다. WNIC의 전력 모드는 일반적으로 CAM(Constantly Awake Mode)와 PSM(Power Saving Mode)가 있다. CAM은 항상 액티브한 상태를 유지하는 모드다. PSM은 슬립 상태와 액티브상태를 전환하며, 주기적으로 깨어나 AP(Access Point)에 전송할 데이터가 있을 경우 전송하는 모드다. CAM과 PSM을 적절히 사용함으로써 QoS의 저하없이 WNIC의 소모전력을 효과적으로 줄여줄 수 있다. 이 기법은 크게 세 가지 방법으로 분류될 수 있다: 보내는 쪽 제어를 통해 패킷을 모아서 한꺼번에 보내는 방법[13-15]은 피드백 방식을 통해 효과적으로 전달되는 패킷의 양을 조절한다. 스트리밍 데이터를 전송할 때 모아서 한꺼번에 보내는 기법을 사용하면 WNIC의 슬립 시간을 효율적으로 취할 수 있다. [13]은 계층화시킨 인코딩 방법을 제시하고 있으며, [15]는 스트리밍 데이터를 모아서 한꺼번에 보내는 정도를 조절하는 방법을 제시한다. [14]는 트래픽-쉐이핑방법을 제시한다. 위와 같은 방법은 모아서 한꺼번에 보내는 정도를 높여서 WNIC의 유휴시간을 증가시킴으로써 WNIC의 소모 에너지를 줄일 수 있다는 장점이 있으나 보내는 쪽과 연동되어 제어되어야 한다는 어려움이 있다. 받는 쪽에서 버퍼 모니터링을 통해 모드를 전환하는 방법인 [9]는 스트리밍 응용을 실행할 때 버퍼 모니터링을 통해 WNIC을 오프 모드로 전환하는 기법으로 버퍼가 가득 찼을 때 WNIC을 저전력으로 전환한다. 하지만 이 방법은 일반적인 응용 프로그램실행 시에 적용이 힘들다는 단점이 있다. 응용의 특성을 파악하여 모드를 전환하는 방법[2,14]은 대표적인 응용의 트래픽 패턴을 프로파일링한다. 네트워크 트래픽을 분석하여 프로파일을 통해 예측된 응용에 대해 미리 정의된 전력 모드로 WNIC을 동작시키는 방법이다. 하지만 전송되어 온 데이터가 프로파일링되어 있지 않은 패턴일 경우 적용이 불가하다는 단점이 있다. [2]가 대표적이다. [14]는 프로파일링기법과 함께 응용 프로그램에 따라 네트워크를 사용하는 특성이 다르다는 점에 기반하여 효율적인 모드전환을 할 수 있는 기법을 제시한다. 하지만 정보를 얻어오기 위해 응용 프로그램의 수정이 필요하다는 단점이 있다.

근래들어 시스템 레벨에서 전력을 제어 하는 기법[3, 6]에 대한 연구가 진행되고 있다. [3]은 데이터 전달 시 모아서 보내는 정도를 증가시켜서 전력 모드간의 전환

횟수를 줄여주어 DFS(Dynamic Frequency Scaling)의 잠재적인 역효과를 줄여주는 기법을 제시한다. 하지만 보내는 쪽의 데드라인과 UDP 전송만을 고려한다는 단점이 있다. [6]은 몇몇 최적화된 모바일 플랫폼을 하나의 통합된 시스템으로 묶음으로써 모바일 디바이스들의 일관성을 높은 레벨에서 제공하는 기법을 제공하고 있다. 하지만 각각의 모바일 시스템에 대한 CPU DVFS와 WNIC DPM 기법은 제시되어 있지 않다. 위와 같이 시스템 레벨에서의 DPM 기법은 아직 CPU의 DVFS와 WNIC의 DPM을 단순히 결합하는 수준에 그치고 있다.

3. 통합 전력 제어 시스템

3.1 동기

CPU와 WNIC의 상호작용을 고려하지 못하는 기존의 방법을 개선할 수 있는 요인을 찾고자 우리는 모바일 임베디드 시스템에서 사용되는 대표적인 응용 중 사용자 대화식 이용 정도의 영향을 거의 받지 않는 스트리밍 데이터에 대하여 CPU, WNIC의 소모 전력을 측정하여 관찰하였다. 실험은 mainstoneII(Bulverde PXA 270)에서 CPU, WNIC, 시스템 전체의 소모 에너지를 측정하였다. WNIC은 CISCO AIRONET 350을 사용하였다. 측정기구로는 Agilent 34970A를 사용하였다.

그림 1은 스트리밍 데이터의 가장 기본적인 조건인 QoS와 bit rate, 그리고 listen interval의 관계를 보이고 있다. 실험한 CPU 전압과 주파수들 중 중간 값에 해당하는 312MHz에 대한 데이터를 대표로 그래프로 나타내었다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 128kbps, 256kbps의 경우 listen interval 600ms까지 프레임 손실이 없었다. 512kbps의 경우 listen interval 200ms까지 프레임 손실이 없었다. 1024kbps와 2048kbps의 경우 WNIC이 CAM 모드일 때는 프레임 손실이 발생하지 않았지만 PSM으로 설정할 경우 프레임 손실이 발생하였다. 동일 bit rate 데이터에 대한 프레임 손실은 CPU 전압과 주파수가 더 낮아지면 더 심해지고, CPU 전압과 주파수가 더 높아지면 더 호전된다. CPU의 전압과 주파수를 조절함과 함께 bit rate 조절과 listen interval 조절을 통하여 더 많은 전력을 절감할 수 있지만 QoS를 만족시키지 못하는 조절에 대해서는 고려하지 않기로 한다. 스트리밍 데이터의 경우에는 PSM으로 설정되어 있는 WNIC에서 소모하는 에너지가 bit rate별, listen interval별로 달라진다. 본 논문은 128kbps, 256kbps, 512kbps, 1024kbps, and 2048kbps의 bit rate로 동일 소요시간을 가지는 MPEG4 파일을 무선 네트워크를 통하여 받아서 디코딩하여 실행하는 동안의 CPU와 WNIC의 전력을 분석하였다. Listen interval은 100ms, 200ms, 400ms, 600ms, 800ms, and 1000ms를 사용하

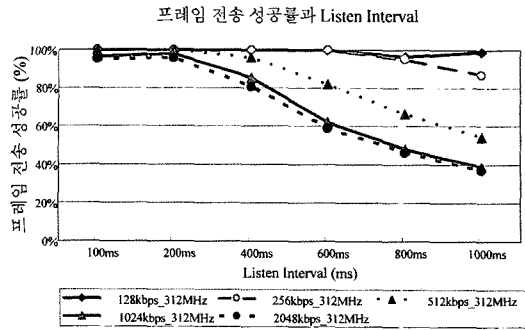


그림 1 스트리밍 데이터의 QoS vs. Listen Interval

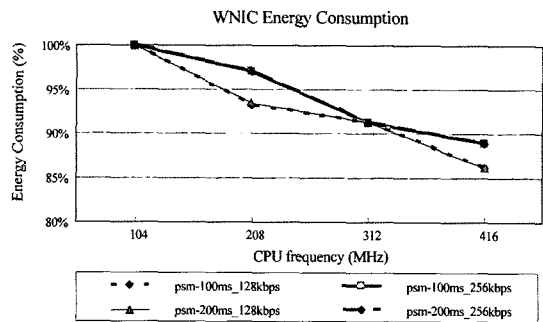


그림 2 스트리밍 응용 실행 시 CPU 전압과 주파수 변화에 따른 WNIC 소모 에너지

였다. CPU는 104MHz(1.11V), 208MHz(1.24V), 312MHz(1.37V), and 416MHz(1.52V)로 공급 전압을 조절하여 소모 에너지를 분석하였다. 그림 2은 무선 네트워크를 사용하는 스트리밍 데이터인 MPEG4 파일을 디코딩할 때 소모되는 CPU와 WNIC의 전력을 bit rate별, listen interval별로 CPU의 주파수에 따라 나타낸 것이다. Listen interval 400ms이상의 데이터와 bit rate 512kbps이상의 데이터가 그래프에서 생략된 이유는 프레임 손실이 발생하여 QoS를 만족시키지 못하였기 때문이다. 그림 2는 가장 에너지를 많이 소모하는 값을 100%로 기준을 잡아 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 CPU의 전압과 주파수가 증가하면 오히려 WNIC의 소모 전력이 줄어든다. CPU가 104MHz로 동작할 경우보다 416MHz로 동작할 경우, listen interval 100ms와 200ms 공통으로 128kbps의 스트리밍 데이터의 경우 약 14%, 256kbps의 스트리밍 데이터의 경우 약 11%의 소모에너지 감소 효과가 있었다. 이 실험결과에 의하여 CPU와 WNIC의 소모 전력은 서로의 전력 상태에 영향을 받을 수 있다. 이는 기존에 서로 독립적이라 여겨졌던 CPU와 WNIC에 대해서 소모 에너지측면에서의 상호작용을 고려하여 전력 제어를 할 경우 시스템 레벨에서 소모 전력을 줄이는데

효과를 얻을 수 있음을 의미한다. 특히 스트리밍 데이터 응용의 경우 일정 bit rate로 처리되고 사용자 대화식 이용 정도가 영향을 끼치지 않으므로 CPU와 WNIC의 소모 에너지의 상호영향을 적절히 활용할 수 있다. 본 논문에서 사용된 스트리밍 데이터 응용은 모든 스트리밍 파일에 대하여 동일 시간 동안 소모되는 전력을 측정했으므로 본 논문에서는 스트리밍 데이터 응용의 경우 소모 전력과 소모 에너지를 같은 요인으로 해석할 수 있다. 본 논문은 CPU와 WNIC의 상호영향을 분석하고 이를 바탕으로 효율적인 시스템 레벨 전력 제어 기법을 제시한다.

3.2 동작 매커니즘

제시되는 매커니즘은 크게 응용 분류단계와 분류된 응용에 따라 효율적으로 CPU와 WNIC의 상호영향을 고려하여 전력 모드를 설정해 주는 단계로 구성된다.

CPU와 WNIC을 동시에 사용하는 응용들은 네트워크 트래픽 특성에 따라 BE(Best Effort) 응용, CBR(Constant Bit Rate) 응용, 그리고 Interactive 응용으로 분류가 된다. BE 응용은 최대한의 대역폭을 사용한다. 대표적 응용으로는 FTP가 있다. CBR 응용은 대역폭을 일정하게 사용한다. 대표적 응용은 스트리밍 데이터 응용이 있다. Interactive 응용은 사용자와의 상호작용에 따라 네트워크 트래픽이 발생하는 응용이다. 대표적 응용으로는 Web browsing과 telnet이 있다.

제시되는 매커니즘은 모니터링단계, 응용 분류 단계, 그리고 전력 모드설정 단계로 구성된다. 제시되는 매커니즘은 제 1단계로 무선 네트워크를 통해 들어오는 네트워크 트래픽들을 커널에서 모니터링하여 분석한다. 이 모니터링 단계는 무선 네트워크를 통해 들어오는 네트워크 트래픽의 유무를 분석하는 단계이다. 이 단계에서는 네트워크 연결여부를 검사하고 네트워크 트래픽이 없는 기간을 측정하여 대화식 이용 정도를 판단하는 자료를 수집한다. 만일 네트워크 트래픽이 발생하면 제 2단계인 응용분류단계로 넘어간다. 응용 분류단계에서는 대역폭 사용률, 패킷 크기, 사용되는 포트번호 등을 통해 네트워크 트래픽의 응용의 종류를 동적으로 BE 응용, CBR 응용, Interactive 응용으로 분류한다. 또한 Interactive 응용인지를 판단하기 위해 수집된 네트워크 트래픽이 없는 기간과 평균 요청 간격을 통해 사용자 대화식 이용 정도를 판단한다. 제 3단계는 전력 모드 설정 단계로 판단된 응용의 종류에 따라 소모 에너지를 줄일 수 있도록 CPU와 WNIC의 전력모드를 설정한다.

다음 식들은 네트워크 트래픽을 분석하여 적절히 응용을 분류하기 위해 사용된다. 식 (1)은 사용된 대역폭과 최대 대역폭을 가지고 대역폭 사용률을 계산하는

방법이다. ftp의 경우 일정하게 높은 대역폭사용률을 보이며, 반면 telnet의 경우 불규칙하면서 낮은 대역폭 사용률을 보이게 된다[2]. 사용된 대역폭은 모아서 전송되는 정도와 관계가 있다. 식 (2)는 모아서 전송되는 정도를 계산하는 방법을 보여준다. 모아서 전송되는 정도(버스트 레벨: Burst Level)는 한 순간에 얼마나 많은 양의 데이터 통신이 이루어지는가를 나타낸다. 대역폭 사용률이 낮을수록 수신된 패킷의 크기가 작다[2]. 그러므로 동일데이터를 전송 받을 때 수신된 패킷의 크기가 작을수록 모아서 전송되는 정도가 높아진다. 이는 액티브 기간에 대한 비액티브 비율과도 비슷한 경향을 보인다[2]. 대역폭 사용률은 수신된 패킷 크기, 버스트 레벨과 반비례의 관계를 나타낸다. 즉, 수신된 패킷의 크기가 클 수록 대역폭을 사용하는 횟수는 줄어들며 모아서 전송하는 정도도 낮아진다. 표 1은 응용의 종류에 따른 수신된 패킷 크기와 버스트 레벨의 관계를 보여준다[2].

$$\text{대역폭 사용률} = \frac{\text{사용된 대역폭}}{\text{최대 대역폭}} \quad (1)$$

$$\text{버스트 레벨} = \frac{\text{수신된 패킷 크기}}{\text{최대 패킷 크기}} \quad (2)$$

CPU 전압과 주파수 변환과 WNIC의 CAM과 PSM 사이의 전환기법을 이용하여 시스템 전력절감의 시너지 효과를 가져오기 위해서 응용의 종류에 따라 CPU와 WNIC의 전력 정책을 선택해야 한다. 본 논문에서 편의상 CPU를 높은전압과 주파수(1.6v, 520MHz in this paper)로 동작시키는 모드를 highVF라 명명하여 사용한다. 그림 3은 응용의 종류를 고려한 CPU와 WNIC의 전력 모드설정을 보여주고 있다.

WNIC이 계속 사용될 경우 CAM으로 설정한다.

WNIC가 CAM이므로 이 경우 시스템의 에너지를 줄일 수 있게 해주는 요소는 CPU가 된다. BE 응용의 경우, CPU의 소모전력을 줄이고자 DVFS로 설정하게 되면 소모시간이 더 걸린다. 이는 오히려 WNIC이 CAM 모드로 지속되는 시간을 늘리게 되므로 소모에너지가 늘어난다. 따라서 네트워크 트래픽이 식 (1), (2) 등에 의해 분석된 결과가 BE 응용의 경우에는 CPU를 highVF로, WNIC은 CAM으로 설정한다. 만일 분석된 결과가 CBR 응용이라면 3.1절에서 살펴본 바와 같이 CPU의 전압과 주파수가 WNIC의 소모 에너지에 영향

표 1 응용들의 특징

	BE	CBR	Interactive
수신된 패킷 크기	large	Medium	small
버스트 레벨	small	small, medium	large

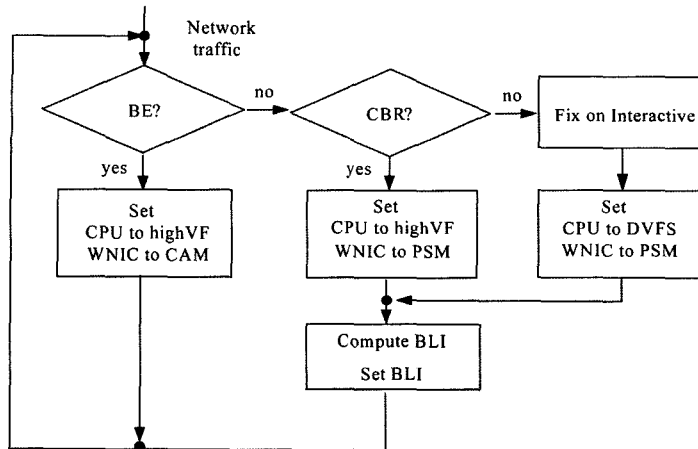


그림 3 응용의 종류에 따른 제시되는 동적 전력 제어

을 끼치므로 CPU를 highVF로 동작시킨다. WNIC은 요구되는 bit rate만 지원하면 QoS가 보장되므로 PSM으로 동작시킨다. 이는 스트리밍 데이터가 사용자 대화식 이용 정도의 영향을 받지 않는다는 점과 일정한 비율로 들어오는 데이터를 처리할 때 WNIC의 디바이스 드라이버 처리시간과 액티브되어 있는 시간이 CPU의 전압과 주파수에 반비례함에 기인한다. 만일 PSM이면서 WNIC이 사용되지 않는 상태라면 CPU를 DVFS로 동작시키는 것이 효율적이다. 만일 분석된 결과가 BE나 CBR이 아니라면 Interactive 응용으로 결정한다. 이 경우 연속해서 CPU와 WNIC이 사용되는 것이 아니므로 일반적으로 CPU는 DVFS로, WNIC는 되도록 PSM을 유지하는 것이 소모 에너지 절감 면에서 유리하다. WNIC을 PSM으로 설정할 경우, PSM에서 세부적으로 조절할 수 있는 요소로는 listen interval 이 있다. Listen interval을 조절할 때 고려할 점은 응용의 QoS를 저하시켜서는 안된다는 것이다. 3.1절에서 살펴본 바와 같이 스트리밍 데이터 응용에서는 보통 600ms 이상이 되면 현격히 QoS가 떨어질 뿐 아니라 재전송 등에 의하여 소모전력도 급격하게 증가한다. 전송되는 프레임의 bit rate이 동일할 때는 listen interval이 커질수록, 동일 listen interval에서는 전송되는 프레임의 bit rate이 커질수록 프레임 손실 발생비율이 높아짐을 알 수 있다. CBR 응용과 Interactive 응용에 대한 best listen interval을 결정하기 위해서는 세션에 대한 정보를 유지함으로써 네트워크 기반 응용을 사용 중인지 예측하고 이를 통해 listen interval을 조절한다. Listen interval을 조절할 때는 QoS가 보장되는가를 고려해야 하는데 수신된 데이터에 따라서 QoS의 저하율이 다르다. Best listen interval을 결정하는 데는 요청 간격, 평균 수신 패킷 크기, 대역폭, RTT가 사용된다. 버퍼에 저장된 사

용 가능한 패킷의 수를 N 이라 하자. The best listen interval을 BLI 라 하자. BLI 는 네트워크 트래픽을 모니터링해서 구해진 요소들을 이용하여 다음과 같이 구해질 수 있다. 들어오는 네트워크 트래픽이 CBR 또는 Interactive 응용으로 분류된 경우에는 CPU와 WNIC의 전력 모드를 설정한 이후 BLI 를 계산 하여 설정한다.

$$BLI = \frac{N * \text{평균 패킷 크기} / \text{가능한 데이터 전송 비율}}{\text{데이터 전송 비율}} \quad (3)$$

(단, 가능한 데이터 전송 비율 >= 최대 데이터 전송 비율)

4. 성능 평가

우리는 제시되는 매커니즘을 평가하기 위하여 BE 응용, CBR 응용, and Interactive 응용을 가지고 기존의 방법과 비교하여 소모 에너지를 분석하였다.

4.1 실험 환경

우리는 Bulverde PXA270 mainstoneII와 CISCO AIRONET 350을 사용하여 CPU와 WNIC에서 소모되는 전력을 각각 측정하였다. 측정도구로는 Agilent 34970A를 사용하였다. 본 실험에 사용한 응용은 BE 응용으로서 ftp 응용, CBR 응용으로서 스트리밍 데이터 응용, Interactive 응용으로서 telnet 응용이다. 각각의 응용을 위해 사용한 CPU와 WNIC의 모드들을 정리하면 표 2와 같다. FTP 응용의 경우 CPU는 highVF와 DVFS로, 그리고 WNIC은 CAM으로 실험하였다. 스트리밍 데이터 응용의 CPU는 DVFS와 416MHz로, 그리고 WNIC은 PSM으로 설정하여 실험하였다. 스트리밍 데이터 응용의 경우 CPU를 위하여 DVFS의 비교대상으로 416MHz를 사용한 이유는 highVF보다 적은 전

표 2 응용의 종류에 따라 실험에 사용된 CPU와 WNIC 전력 모드

응용	CPU	WNIC	Listen Interval
FTP	HighVF (1.6V, 520MHz) DVFS	CAM	-
스트리밍 데이터 응용	416MHz DVFS	CAM PSM	Computed BLI
Telnet	HighVF (1.6V, 520MHz) DVFS	CAM PSM	Computed BLI

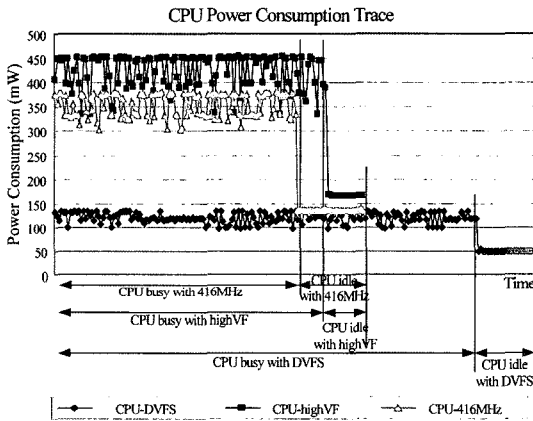


그림 4 FTP응용 수행 시 CPU-DVFS and CPU-highVF의 전력비교

력을 사용하면서 비슷한 성능을 보이기 때문에 CPU의 소모 에너지를 줄일 수 있기 때문이다. Telnet 응용의 경우 CPU는 highVF와 DVFS로, 그리고 WNIC은 기본적으로 PSM으로 설정하되 모니터링결과에 의거하여 사용자 대화식 이용 정도에 따라 listen interval을 3.2절에 제안된 방법으로 조절하였다.

CPU의 DVFS방법은 기존의 여러 연구들이 있다. 본 논문에서는 본 연구실에서 연구하여 발표된 모바일 임베디드 시스템 환경에 적합하도록 배터리의 잔량을 고려하여 모바일 임베디드 시스템의 사용가능 시간을 늘려줄 수 있도록 CPU의 전압과 주파수를 조절하는 DVFS방법[8]을 채택하여 사용하였다. 그림 4는 1Mbyte의 파일을 FTP로 전송했을 때 highVF, 416MHz, 그리고 [8]의 DVFS를 사용했을 때의 trace를 보이고 있다. 기존의 방법들은 CPU와 WNIC을 동시에 고려하지 않았으므로 CPU에 대하여는 DVFS가 효율적이라고 생각하였다. 그리고 WNIC은 PSM으로 동작시키는 것이 효율적이라 생각하였다. 따라서 제시되는 매커니즘과 비교되는 기존의 매커니즘은 CPU는 DVFS, WNIC은 PSM으로 동작시키는 것으로 가정한다.

4.2 소모 에너지 분석

제시되는 매커니즘을 각 응용에 대한 전력 소모와 시간 소모를 반영한 소모 에너지를 기준으로 평가하되 QoS가 보장되는 것을 전제로 한 데이터만 논의한다. 편의상 기존의 방법들은 CPU와 WNIC의 전력 정책을 따로 고려하였으므로 Separate DPM이라 하고, 제시되는 매커니즘은 Integrated DPM이라 별명을 붙여서 사용한다.

FTP 응용의 경우, 기존의 Separate DPM에서는 BE 응용이므로 최대한 빨리 처리해 주기 위해서 WNIC은 CAM으로 설정하였다. 하지만 CPU의 전압과 주파수는 특별히 고려되지 않았다. 본 논문에서는 CPU를 highVF 모드로 동작시킬 때와 DVFS로 동작시킬 때의 CPU와 WNIC에서 소모하는 에너지의 합으로 FTP 응용에 효율적인 시스템 레벨 DPM을 제안한다. 그림 5는 CPU를 highVF 모드로 동작시킬 때와 DVFS로 동작시킬 때의 비교결과를 보여준다. 전송되는 파일의 크기는 1Mbyte, 2Mbyte, 4Mbyte, 그리고 8Mbyte로 실험하였다. 본 실험을 통하여서 CPU를 DVFS로 동작시킬 때보다 오히려 highVF로 동작시키는 것이 평균 8%의 에너지 절약 효과가 있음을 알 수 있다.

스트리밍 데이터 응용은 일정한 비율로 패킷이 들어와 CPU에서 디코딩되어 사용되며, 사용자 대화식 이용 정도의 영향을 받지 않으므로 CPU와 WNIC의 상호영향 관계를 살펴볼 수 있는 중요한 응용이다. 기존의 방법인 Separate DPM은 CPU를 QoS를 보장하는 전제하에 가능한 낮은 전압과 주파수로, WNIC을 PSM으로 운용하는 것이었지만 실험 결과 Integrated DPM으로 할 경우 CPU를 높은 전압과 주파수로 하는 것이 오히려 WNIC의 에너지를 절감시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그림 6은 128kbps와 256kbps의 스트리밍 데이터 각각에 대한 CPU를 DVFS로 동작시킬 때와 416MHz로 동작시킬 때의 CPU와 WNIC의 소모되는 에너지의 비교를 보여주고 있다. 프레임 손실이 발생하지 않은

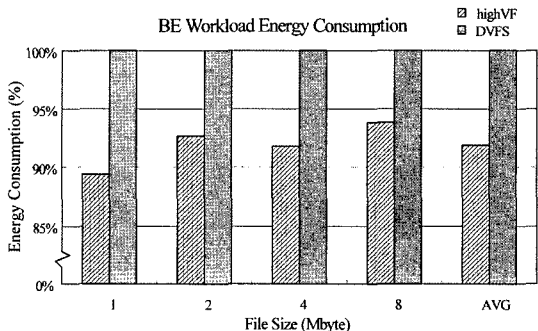


그림 5 FTP 응용 수행 시 DVFS와 highVF의 소모 에너지 비교

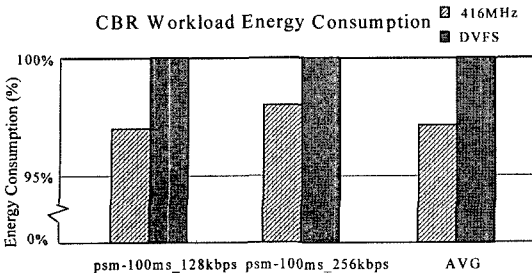


그림 6 스트리밍 데이터 응용 수행 시 DVFS and 416MHz 간의 소모 전력 비교

128kbps와 256kbps의 데이터를 listen interval 100ms와 200ms에서 실험하여 비교하였다. 단, listen interval 100ms과 200ms으로 설정할 경우 소모 에너지에 영향이 없어 스트리밍 데이터의 경우 listen interval의 요소는 생략하여 비교한다. 스트리밍 데이터 응용의 경우, 네트워크의 상태가 실험결과에 영향을 끼치지 못하도록 하기 위하여 측정된 데이터 중 앞부분의 네트워크에 영향을 받는 부분과 뒷부분의 CPU에 영향을 받는 부분을 빼고 중간 일정시간 동안의 데이터만 사용하였으므로 소모 전력과 소모 에너지가 같은 의미로 쓰일 수 있다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 제시되는 Integrated DPM정책이 기존의 Separate DPM정책보다 128kbps, 256kbps에 대해서 CPU를 에너지를 줄일 수 있었다. CPU를 높은 전압과 주파수로 운용할 때 CPU의 소모에너지가 증가되는 면은 있으나, 시스템 전체의 소모 에너지를 고려하였을 때 CPU에서 증가 되는 소모 에너지보다 WNIC에서 줄어드는 소모 에너지가 크기 때문에 시스템의 소모 에너지를 줄이는 데 유리하다.

Telnet 응용의 경우 기존의 separate DPM은 각각 CPU는 DVFS로, WNIC은 PSM으로 설정하였다. 본 논문은 CPU를 highVF로 사용할 경우와 DVFS로 운용할 경우에 대하여 WNIC을 CAM과 PSM으로 설정하면서 listen interval을 조절하여 소모되는 에너지를 측정하였다. 뿐만 아니라 listen interval 100ms, 400ms, 800ms와 함께 3.2절에 설명된 BLI(best listen interval)을 적용한 결과를 비교하였다. 그림 7은 CPU를 highVF와 DVFS로 설정할 때 각각에 대해 WNIC의 모드와 listen interval 정책에 따른 소모 에너지의 비교를 보여준다. 제시되는 매커니즘에 따라 PSM모드에서 BLI를 계산하여 적용한 결과 소모에너지를 최대 25%, 평균 16%까지 줄일 수 있었다.

5. 결론

무선 네트워크를 사용하는 배터리 기반 모바일 임베디드 시스템의 효율적인 전력 관리를 위해 본 논문은

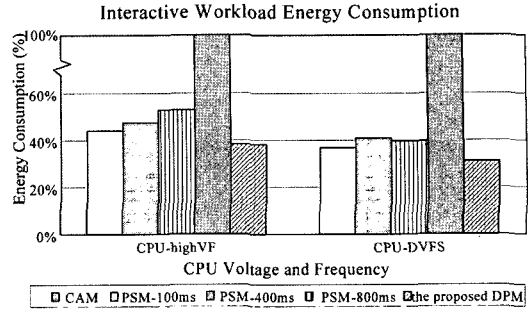


그림 7 Telnet 응용 수행 시의 DVFS와 highVF 간의 소모 에너지 비교

기존에 고려하지 못했던 CPU와 WNIC의 상호영향과 응용의 종류를 고려한 시스템 레벨 동적 전력 제어 기법을 제시한다. 시스템의 소모 전력을 줄이기 위한 기존의 연구는 시스템 요소들 간의 상호 영향을 파악하여 전력을 조절하는 정책에 대해서는 미비하였다. 또한 전체 시스템의 전력 정책을 구성할 때도 각 요소들의 전력 정책을 서로 상관없다는 가정하에 단순히 결합한 정도에 그쳤다. 본 논문은 CPU의 전압과 주파수, 그리고 WNIC의 CAM, PSM, listen interval의 조절 시 CPU와 WNIC의 소모 에너지의 상호 영향을 분석하고 이를 토대로 대역폭사용률, 패킷 크기, 모아서 전송되는 정도, 사용되는 포트번호, 평균 요청 간격 등을 고려하여 응용들을 BE 응용, CBR 응용, Interactive 응용으로 분류하여 각 응용에 적합하게 CPU와 WNIC의 전력 모드를 설정하는 매커니즘을 제시한다. 제시되는 매커니즘을 통하여 기존의 CPU의 DVFS와 WNIC의 DPM을 단순히 결합하는 방법보다 BE 응용, CBR 응용, and Interactive 응용에 대해 평균 9%, 최대 16%의 에너지 절약 효과를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] AbouGhazaleh, N., Mayo, R. N., Ranganathan, P., "Idle time Power management for personal Wireless Devices," Technical Reports, HP laboratories, 2003.
- [2] Weissel, A., Faerber, M., Bellosa, F., "Application Characterization for Wireless Network Power Management," Proceedings of the International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS'04), 2004.
- [3] Poellabauer, C., Schwan, K., "Energy-aware traffic shaping for wireless real-time applications," Proceedings of RTAS' 04, 48-55, 2004.
- [4] Jones, C. E., Sivalingam, K. M., Agrawal, P., Chen, J. C., "A survey of energy efficient network protocols for wireless networks," Wireless Net-

works, Vol.7, No.4, 343-358, 2001.

- [5] Rakhmatov, D. S., Vruthula, "Energy management for battery-powered embedded systems," ACM Transactions on Embedded Computing System 2 (3), 277-324, 2003.
- [6] Martin, T.L., "Balancing Batteries, Power and Performance: System Issues in CPU Speed-Setting for Mobile Computing," Ph.D. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, 1999.
- [7] Anand, M., Nightingale, E. B., Flinn, J., "Self-Tuning Network Power Management," Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, 2003.
- [8] Choi, S., Cha, H., Ha, R., "A selective DVS technique based on battery residual," Microprocessors and Microsystems, 1-10, 2005.
- [9] Bertozzi, D., Benini, L., Ricco, B., "Power Aware Network Interface Management for Streaming Multimedia," Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference, 2002.
- [10] Benini, L., Michele, G., "System-level power optimization: techniques and tools," ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, 115-192, 2000.
- [11] Flautner, K., Reinhardt, S., Mudge, T., "Automatic performance-setting for dynamic voltage scaling," Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM-7), Rome, 260-271, 2001.
- [12] Flautner, K., Mudge, T., "Vertigo: automatic performance-setting for linux," Proceedings of the Fifth USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 105-116, 2002.
- [13] Choi, K., Kim, K., Pedram, M., "Energy-Aware MPEG-4 FGS Streaming," Proceedings of 40th Design Automation Conference, 2003.
- [14] Chandra, S., Vahdat, A., "Application-specific Network Management for Energy-aware Streaming of Popular Multimedia Formats," Proceedings of USENIX Annual Technical Conference, 2002.
- [15] Korhonen, J., Wang, Y., "Power-Efficient Streaming for Mobile Terminals," 2005 International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV-05), Skamania, Oregon, USA, 2005.
- [16] Zhong, L., Jha, N. K., "Dynamic Power Optimization of Interactive Systems," VLSI Design, 1041-1047, 2004.



민 정 희

1995년 동덕여자대학교 전자계산학과 학사. 2003년 연세대학교 컴퓨터과학과 석사. 2006년 현재 연세대학교 컴퓨터과학과 박사과정. 관심분야는 저전력 임베디드 시스템, 임베디드 운영체제, 시스템 소프트웨어



차 호 정

1985년 서울대학교 컴퓨터공학 학사. 1987년 서울대학교 컴퓨터공학 석사. 1991년 University of Manchester 전산학 박사. 1993년~2001년 광운대학교 컴퓨터과학과 부교수. 2001년~현재 연세대학교 컴퓨터과학과 교수. 관심분야는 멀티미디어 시스템, 운영체제, 내장형시스템, 무선센서네트워크 시스템